

4. Патент РФ № 2538579, В01F 13/10. Устройство для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов. Севостьянов В.С., Ильина Т.Н., Севостьянов М.В., Емельянов Д.А., Кошуков А.В.; заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. заявл. 12.08.2013; опубл. 10.01.2015 Бюл. № 1. 6 с.

УДК 624.21

## КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТРАНСПОРТНОМ ТРОИТЕЛЬСТВЕ. ЯПОНИЯ И ДРУГИЕ СТРАНЫ

студент А.Ф. Гомолко, студент Д.В. Кузьмич  
(Научный руководитель В.А. Ходяков)  
Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь, xva609@gmail.com

Объектом исследования является раскрытие области применения композитных материалов в мостовом строительстве разных стран, а также других отраслях. Опыт работы конструкций из композитных материалов и некоторые особенности композитов, а также экономическое сравнение конструкций из композитных материалов. Рассмотрены как отдельные конструкции из композитов, так и мостовые сооружения в целом в Японии, Канаде, Российской Федерации, а также опыт применения в нашей стране. Описана модель цельнокомпозитного решетчатого пролетного строения из пултрузионных стеклопластиковых профилей, созданная в 2010 г. на кафедре «Мосты» СГУПС. Некоторые композитные материалы используются на практике около 20, но это не останавливает развитие данной области, исследования ведутся и по сей день. С целью повышения и так хороших показателей композитов, так и с целью доработки недостатков композитных материалов.

**Ключевые слова:** composites; composite materials; composite structures; japan; bridges; construction; transport.

Внедрение композитных материалов в мостостроении актуально как никогда. Современные полимерные композиты и изделия из них находят применение в строительстве транспортной инфраструктуры. В данный момент в мире все больше традиционных материалов заменяются полимерами и композитами, что неудивительно, ведь полимеры обладают рядом преимуществ. Они не утяжеляют конструкцию, обладают достаточно высокой прочностью и стойкостью к агрессивным воздействиям окружающей среды, не подвержены коррозии и в случае проведения ремонтных работ отпадает необходимость останавливать движение по мостам.

Япония уже начиная с 90-х годов прошлого века строит целые мосты с использованием FRP (Glass fiber reinforced plastic) и довольно преуспела в строительстве «пластиковых» мостов. Актуальность возведения таких мостов довольно высока, так как окружающая среда довольно агрессивна. Солёная вода, большая влажность, газы и накопления от автомобильных дорог негативно сказываются на состоянии железно-бетонных мостов, но не так сильно сказываются на мостах из композитных материалов.

В настоящее время по всему миру насчитывается уже более 400 мостов с использованием полимерных композиционных материалов и с каждым годом это число увеличивается, что доказывает полезность данных конструкций.

В Беларуси хорошо развита химическая промышленность, на базе которой можно создавать составляющие композитных материалов и изделия из них, что позволит заменить дорогие металлические конструкции на более дешёвые материалы из пластика. Так же

использование композитных материалов довольно экологично, что сейчас немаловажно. Композиты нетоксичны для человека и природы, а срок их службы составляет от 50 лет.

Япония – страна контрастов, место, где могут сочетаться и древние традиции, и современные тенденции. Здесь можно встретить как небольшие традиционные мосты, украшающие парки и сады, так и огромные современные мосты связывающие острова. Значение мостов здесь велико, они фактически соединяют страну, разбросанную по островам, в единое целое. Волнистый силуэт мостов, характерный для японского мостостроения, объясняется не только потребностью прохождения под ними высоких судов, но и эстетическими представлениями. Япония расположена в вулканической зоне Тихоокеанского огненного кольца. Японские острова делятся на три района - остров Хоккайдо, северо-восточная часть остров Хонсю, юго-западная часть остров Хонсю, острова Сикоку и Кюсю и архипелаг Рюкю. На территории всех островов происходят подземные толчки и периодическая вулканическая деятельность. Почвы Японии малоплодородные. Их свойства тесно связаны с географией местоположения, а также с геоморфологическими свойствами. В горной местности преобладают маломощные почвы, которые подвержены механическим нарушениям строения почвенного профиля под влиянием землетрясений. На аллювиальных равнинах почвы более высоких террас часто выщелочены и вообще неплодородны, а более низких террас и пойм – отличаются тяжелым механическим составом и слабо дренированы. На островах Сикоку, Кюсю и на юге Хонсю сформировались желто-красные ферралитные и ферсиаллитные кислые почвы. На востоке Хонсю преобладают буроземы. В условиях прохладного и влажного климата Хоккайдо и северного Хонсю формируются горные буроземы, пеплово-вулканические многогумусные кислые аллофановые (андосоли) и выщелоченные коричневые почвы. По гидрологии Япония разделена на систему артезианских бассейнов, которые представляют собой небольшие впадины с кайнозойским выполнением. Подземные воды ультрапресные. Палеогеновые и миоценовые отложения артезианских бассейнов описываются слабой водоносностью и проницаемостью. Плиоценовые пески и песчаники обладают большей водоносной способностью. Для всего разреза неогеновых отложений характерно распространение минерализованных (от 3 до 35 г/л) подземных вод.

#### **Стекловолокно и перспективы его применения**

В связи с растущими требованиями к качеству, долговечности и стоимости бетонных конструкций, на рынке материалов появилась неметаллическая арматура, состоящая из: базальтовых, стеклопластиковых, углепластиковых, арамидных, полимерных и других волокон. Область применения стеклопластика обширна. Используется в мостостроении, в дорожном строительстве для сооружения насыпей, устройства покрытий, для элементов дорог, которые подвергаются агрессивному воздействию противогололёдных реагентов, для железнодорожных переездов. Также применяется для укрепления откосов дорог, в строительстве мостов для проезжей части, пролётных строений, опор.

Стекловолокно (Рис.1) — это быстро вытягиваемая нить из расплавленного стекла. В зависимости от компонентов сырья ее можно разделить на щелочные, безщелочные, среднещелочные и специальные стеклянные волокна, такие как волокна с высоким содержанием кремнезема, кварца и так далее. Изделия из стекловолокна (армированный стекловолокном холст) — это в основном слой из стекловолокна, войлока и специальной трехмерной оболочки. Существуют различные технологии плетения стеклонитей. К примеру, расплавленное стекло определенного состава экструзируется на тончайшие нити, их  $n$ -ое количество, которые связываются между собой специальной пропиткой. Используются связующие смолы, на основе которых после соответствующей химико-технологической обработки образуется полимерная матрица, определяющая физико-химические свойства и эксплуатационные качества стеклопластика. Композитные материалы, армированные стекловолокном, благодаря их легкости, коррозионной стойкости, изоляции и другим характеристикам, могут широко использоваться в

строительстве транспортных сооружений, автомобильном строении, химической промышленности и других областях.

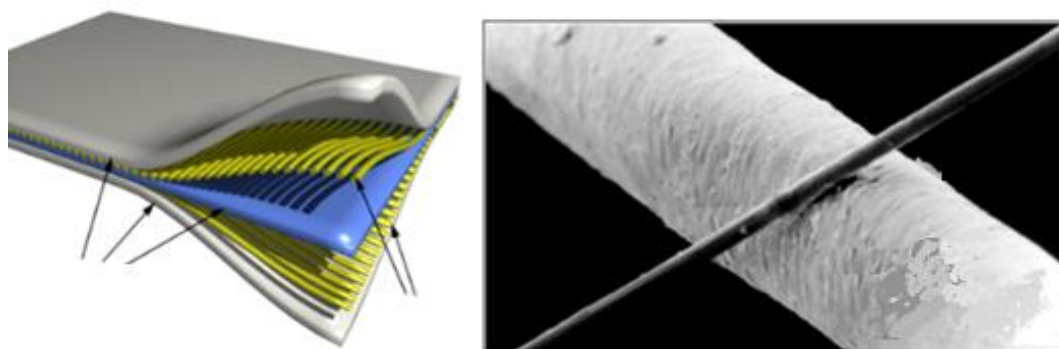


Рис. 1. Композитная арматура, армированная стекловолокном

В связи с растущим рыночным спросом на стекловолокно и иные композитные материалы в области автомобильной промышленности, был сделан большой шаг в развитии промышленности стекловолокна. Некоторые новые процессы и новые продукты, появившиеся в последние годы, такие как термопласты, армированные длинным волокном, листы из термопластов, армированные стекловолокном (СМТ), и программируемые процессы предварительной формовки порошка (процессы Р4), разработаны для автомобильной промышленности.

В долгосрочной перспективе укрепление и трансформация инфраструктуры на Ближнем Востоке и в Азиатско-Тихоокеанском регионе значительно увеличили спрос на стекловолокно. В связи с растущим глобальным спросом на стекловолокно в модифицированных стекловолокном пластмассах, спортивном оборудовании, аэрокосмической промышленности и других аспектах перспективы отрасли стекловолокна по-прежнему оптимистичны. Кроме того, область применения стекловолокна была расширена на рынок ветроэнергетики, что может стать крупным толчком для будущего развития стекловолокна.

Согласно последним прогнозам, обусловленные глобальным промышленным ростом, среднегодовые темпы роста использования стекловолокна составили 7%. Общая стоимость мирового рынка материалов, армированных стекловолокном, достигает 7,7 миллиардов долларов США. Глобальный рост населения и изменение климата обуславливает использование композитных материалов из стекловолокна, которые обладают легкостью, ударопрочностью, долговечностью и высокой прочностью.

#### **Композиты в строительстве мостов Японии**

В 1990 году Япония построила целый мостовой переход (Рис.2) с использованием FRP (Glass fiber reinforced plastic) и при поддержке RIPW (Научно-исследовательский институт общественных работ).

Построенный экспериментальный мост стал образцом наблюдения за поведением в нем как арматуры из углепластика, так и из стекловолокна. Этот мост имеет пролёт у береговых опор 4,5 м.

Основной пролет между промежуточными опорами составляет 11,0 м, высота пролета- 2,0 м. В конструкции вес каждого компонента составляет менее 150 кг. Для соединения используются болты FRP диаметром 16 мм. Опоры моста, пролетные балки и поручни — все это профили из стекловолокна, укрепленные внешним армированием в виде углепластиковой арматуры, которая предохраняет основную арматуру моста из стеклопластика при перспективном росте нагрузки на пролетные строения мостового сооружения.



Рис. 2. Мост с применением полимерных композитных пластмасс

В 2000 году было завершено строительство моста FRP в Японии. После наблюдения за поведением такого моста было принято решение о строительстве пешеходного моста из композита в провинции Сагами (Рис.3), на который действуют и агрессивные среды в виде соленой воды, и в виде газов и накоплений от автомобильной дороги.

Бюджет проектов немного выше, чем у обычных мостов, примерно на 10%, но на момент завершения было установлено, что стоимость строительства примерно эквивалентна стоимости обычных стальных и смешанных мостов. Причина в том, что стоимость строительства моста из стеклопластика выше, по сравнению с обычным мостом. Но если учесть то, что содержание FRP-моста намного дешевле и срок службы таких мостов больше, то мосты из композитных материалов будут в перспективе иметь большую выгоду вложенных в них денежных средств, а также не требовать своего частого обслуживания.



Рис. 3. Мост в провинции Сагами

### Применение стекловолокна в мире

Мост через реку Нипигон (Канада) является первым вантовым мостом в системе автомагистралей Онтарио и первым вантовым мостом в мире, в котором используется армированное стекловолокно полимерного железобетона (GFRP-RC) (Рис.4). Этот вид GFRP изготовлен из винилэфирной смолы и не содержит бора E-стекловолокнистый композит (низкой электрической проводимости).



Рис. 4. Бетон, армированный стеклянным волокном

Бра Бенмокрейн, профессор гражданского строительства в Университете Шелбрука, помог проекту воплотиться в жизнь. Он считает, что использование GFRP-RC для строительства 252-метрового настила для моста является инновационным и необходимым. Поскольку мост является единственным транспортным сооружением из восточной Канады на запад, остановка и техническое обслуживание заставят водителей свернуть на юг и проехать через Соединенные Штаты. Поэтому вместо того, чтобы использовать контрфорсы для укрепления моста, инженеры выбрали конструкцию вантового моста.

Однако с инженерной точки зрения вантовые мосты гораздо сложнее проектировать, чем традиционные мосты, поскольку они выдерживают давление до 9000 фунтов на квадратный дюйм. Бенмокрейн сказал, что, когда бетон начал разрушаться, было логически невозможно отремонтировать настил вантового моста.

Бенмокрейн и его команда изучили и построили восемь участков настила из GFRP-RC, два обычно усиленных участка и проверили на них воздействие нагрузок. Ребра из стекловолокна, соединенные концами с высокопрочным волокнистым железобетоном шириной 220 мм (UHPRC), показали, что на практике они обладают высокой прочностью на растяжение и модулем упругости, а также при проверке не проявили явных трещин.

Bot Construction и Ferroviai Agroman, две строительные компании, ускорили процесс строительства, предварительно отлив плиты настила и соединив их. После строительства настила моста Bot и Ferroviai изготовили в общей сложности 182 стальных свай глубиной заложения от 50 до 70 метров для монолита нижней конструкции опор. Затем они установили сборный центральный пилон. Пилон соединён с мостом 66 стальными вантами.

Бенмокрейн отмечал, что этот мост является знаковым достижением для индустрии композитных материалов, поскольку ожидается дальнейшее расширение рынка композитных материалов. На Международной конференции по мостостроению, проходившей в Нэшнл-Харбор, штат Мэриленд, Бенмокрейн представил конструкцию

этого моста и преимущества FRP. Он сказал, что был очень счастлив: “Основываясь на полученных мною отзывах, я действительно надеюсь, что в будущем мы сможем увидеть больше мостов по всему миру, использующих этот метод усиления. Эти мосты очень экономичны, элегантны и имеют высокую эстетическую ценность.”. Он уверен в том, что такие конструкции, как мост через реку Нипигон, могут открыть двери для многих композитных материалов.

Первоначальная стоимость бетонного моста, армированного ребрами из стекловолокна, почти такая же, как у бетонного моста, армированного композитными холстами или оцинкованной сталью. Цена арматуры из нержавеющей стали также в 2-4 раза выше, чем у арматуры из стекловолокна.

К настоящему времени насчитывается уже более 400 мостов с использованием полимерных композиционных материалов. Эти мосты представлены разнообразными конструктивными решениями – фермы, арки, вантовые и висячие конструкции, при чем композиты применяются в различных по характеру работы несущих элементах – раскосы, стойки, подвески, балки, гибкие и жесткие ванты, плиты проезжей части и другое.

В 2010 г. на кафедре «Мосты» СГУПС были проведены теоретические исследования цельнокомпозитного решетчатого пролетного строения из пултрузионных стеклопластиковых профилей, запроектированных по аналогии со стальными фермами. Такие конструкции стали популярны при строительстве пешеходных мостов из полимеров в России. Однако на практике выявились различные недостатки и потребовалась модернизация.

На основании проведенного анализа были сформулированы следующие рекомендации по совершенствованию конструктивного решения:

- 1) конструкции проходной (проезжей) части необходимо включать в работу с фермами для увеличения общей жесткости пролетного строения;
- 2) для возможности применения пролетных строений в автомобильных мостах целесообразно организовывать движение нагрузки сверху;
- 3) в качестве основы для модернизации следует рассматривать деревянные конструкции традиционных конструктивных схем;
- 4) несущие элементы ферм должны быть небольшого размера (длиной до 2 м), что позволит проектировать компактные соединения благодаря небольшим по величине усилиям;
- 5) соединения должны быть надежными, технологичными и исключать подвижки элементов.

После разработки и расчета в итоге создали опытное гибридное по материалу пролетное строение (Рис.5). За основу были приняты многораскосные решетчатые фермы системы «Тауна» поверху которых было решено устроить железобетонную плиту и включить ее в совместную работу с фермами. Такое решение позволило обеспечить требуемую жесткость пролетного строения при высоте сопоставимой с типовыми железобетонными балками, а в монтажных соединениях стеклопластиковых элементов отказаться от металлических фасонки.

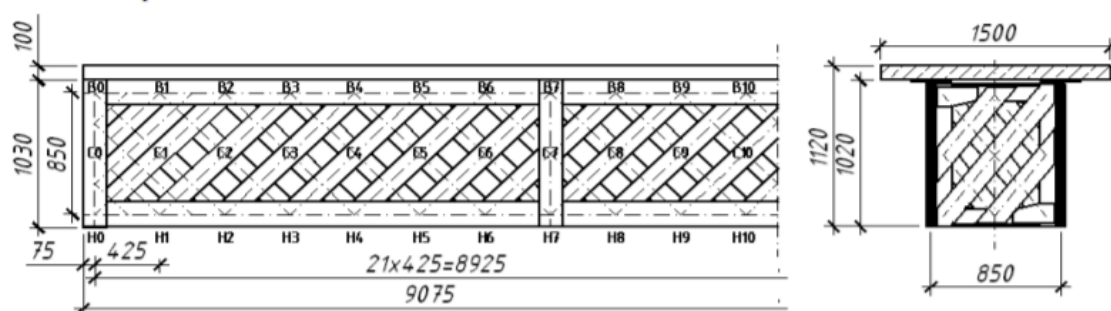


Рис. 5. Схематичное опытное пролетное строение

После испытаний воздействием кратковременной нагрузки конструкция показала, что работает упруго, зафиксированные остаточные деформации не превышают предельно допустимых значений. По результатам анализа динамических параметров конструкции выявлено снижение декремента затухания собственных колебаний после испытаний на 34 % в вертикальной плоскости и 23 % в горизонтальной. Причиной снижения жесткости являются неплотности в соединениях на обычных болтах, которые приводят к подвижке стеклопластиковых элементов, и конструкция жестких упоров не в достаточной мере обеспечивающая упругое включение плиты в совместную работу с фермами и не позволяющая воспринимать усилия, «отрывающие» плиту от ферм.

По результатам исследования сформировали и на практике скорректировали модель расчета композитной конструкции и обосновали возможность применения гибридной конструкции на пешеходных и автодорожных мостах.

### **Композитные материалы и их применение в Беларуси**

Использование композитных материалов стоит расширять в нашей стране, так как у каждого вида композита, будь то стеклопластик или углепластик, свои особенности, одни хорошо работают в агрессивных средах, а другие не могут длительно эксплуатироваться в таких же средах, у одних малая жесткость, а у других сопоставимая или превосходящая жесткость металлических стержней, поэтому стоит тщательно подбирать материал исходя из места и условия его применения, а также физико-химических характеристик композитов. Всё же основным аргументом в применении композитов является экологичность самих материалов, сырья для их производства и сама технология производства композитов. Композиты при их эксплуатации являются нетоксичными для человека и в конструкциях срок службы составляет около 50 лет и более. Так как материал создан полностью искусственно, то можно в таком случае регулировать процесс его разложения, тогда такой материал не составит труда утилизировать или использовать повторно в другом виде, к примеру в виде армирующих волокон в бетонный камень.

В нашей стране имеются примеры применения углеродных холстов и других видов композитов. При реконструкции моста через реку Воложинка по трассе М6 было применено локальное усиление мест, подверженных разрушению балки пролетного строения, с приклеиванием таких холстов и приклеиванием их на эпоксидную смолу (Рис.6). При ремонте некоторых мостов Беларуси иногда используют плиты ездового полотна из композитов, которые хорошо себя зарекомендовали при эксплуатации в соседних странах и странах Запада и Востока.

Из практики заметно, что реализация стеклопластиковой арматуры происходит по схожей цене с металлической арматурой. Производители гарантируют высокую прочность, превосходящую почти в 2 раза металлическую арматуру, однако неметаллическая арматура имеет малую жесткость, о чем свидетельствует её поставка в скрученных бухтах, что не позволяет добиться жесткости в бетонных конструкциях, также очень опасным фактором служит щелочная среда, где стекловолокно буквально рассыпается при незначительной нагрузке и пропадает сцеплением с бетоном. Так как при гидратации цемента pH бетона может достигать 12 единиц, поэтому следует рассматривать другие виды неметаллических арматур, которые превосходят по прочностным показателям и химическим воздействиям.

В общем и целом, производство и использование композитных материалов актуально. За последние 30 лет изделия из композита уже рассчитаны как в отдельных конструктивных элементах, так и в целом сооружении и опробовано на практике. При этом разработка новых материалов не стоит на месте, и предлагаются новые решения и конструкции. В работе не раз доказана долговечность и удобство использования композитных материалов, поэтому их начальная стоимость не должна стать отталкивающим фактором при выборе материалов для сооружения.

При исследовании FRP мостов Японии стоит подчеркнуть стойкость использованных материалов к агрессивным средам и их долговечность. Это и будет ещё

одним аспектом сравнения железобетонных мостов и стальных мостов с мостами из композитных материалов при строительстве новых мостовых переходов.



Рис. 6. Локальное армирование балки моста

Так как в Беларуси имеются заводы по производству полимеров, то внедрение относительно новых технологий создания композитов не составит больших затрат, поэтому следующей задачей станет поиск инвестиции на модернизацию заводов под изготовление конструкций и элементов конструкций на основе этих материалов. Модернизация производства снизит цену для реализации материалов и конструктивных элементов потребителям нашей страны и странам, расположенных рядом с нами, а также откроется новый рынок для реализации таких продуктов.

По результатам исследования и апробирования можно сделать вывод, что внедрение композитных материалов действительно целесообразно и актуально с точки зрения уменьшения цены сооружения в долгосрочном периоде и увеличения срока службы конструкции.

#### Литература

1. Российская национальная нанотехнологическая сеть [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rusnanonet.ru/nanoindustry/construction/constr\\_application/bridge\\_apatech/](http://www.rusnanonet.ru/nanoindustry/construction/constr_application/bridge_apatech/). – Дата доступа 30.11.2019
2. Статья про мосты из композитов отдельных Японских сооружений и мостов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fanwen.geren-jianli.org/726748.html>. – Дата доступа: 07.29.2020
3. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» том 9 выпуск №2 март-апрель 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [naukovedenie.ru/PDF/81TVN217.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN217.pdf). – Дата доступа 01.08.2019
4. Еженедельник Объединенного института ядерных исследований [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jinrmag.jinr.ru/win/2010/43/mo43.htm>. – Дата доступа: 21.12.2019



5. fx361 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fx361.com/page/2018/0514/6250243.shtml>. – Дата доступа: 27.12.2018
6. Fanwen geren jianli [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fanwen.gerenjianli.org/726748.html>. – Дата доступа: 07.29.2018
7. Электронная библиотека Белорусско-Российского университета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/8368/9.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. – Дата доступа: 20.10.2021
8. Патент 4082 РБ, МПК7 Е 04 С 2/28. Композитный несущий элемент строительных конструкций / В. М. Фридкин, А.В. Носарев, С.К. Павлюк, А.В. Семенов, В.А. Попковский, А.А. Филатенков; заявитель и патентообладатель Могилевский машиностроительный институт. - № 970421; заявл. 29.07.97; опубл. 19.04.01, Бюл. № 3. - 3 с.: ил.
9. Патент 2181406 РФ, МПК7 Е 01 Д 12/00, Е 04 С 2/24. Композитный несущий элемент строительных конструкций / В. М. Фридкин, А.В. Носарев, С.К. Павлюк, А.В. Семенов, В.А. Попковский, А.А. Филатенков; заявитель и патентообладатель Могилевский машиностроительный институт. - № 97121947; заявл. 29.07.97; опубл. 20.04.02, Бюл. № 11. - 6 с.: ил.
10. Кузменко И.М. Новые направления в конструировании композиционных структур с высокой экономической эффективностью и несущей способностью / И.М. Кузменко, В.А. Попковский, А.В. Семенов, В.М. Фридкин // «Nove smery vo vyrobnych technologiach». Сб. статей IV межд. конф. - Presov, 1999. - С. 83-86

УДК 624.21

## ИННОВАЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОСТОВ

студент Ю.В. Кулаго  
(Научный руководитель В.А. Ходяков)  
Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь, xva609@gmail.com

Объектами исследования являются нововведения в проектировании и строительстве мостовых сооружений. Целью работы стала изучение ранее исследуемых автором инноваций в строительстве и архитектуре всемирных мостовых сооружений. В основу работы положены результаты многолетних исследований, описываемые в предыдущих работах автора «Инновации в строительстве мостов», «Беспилотные летательные устройства в проектировании и строительстве мостов» и «Инновации в строительстве мостов Сингапура». В результате исследования были выявлены особенности современных методов проектирования и строительства мостовых сооружений. Нет сомнения, что в ближайшем будущем описанные в работе инновации в проектировании и строительстве будут внедряться и на территории Республики Беларусь.

**Ключевые слова:** архитектура; инновации; строительство; беспилотные летательные аппараты.

21 век – век новых технологий. Технологии появляются и в мостостроении. Задача данных технологий состоит в том, чтобы облегчить работу инженерам. Также благодаря инновациям в данном вопросе улучшаются не только технические характеристики, но и видовые, два данных факта и отразятся в работе.

В Республике Беларусь вопрос новых технологий в строительстве и проектировании мостов не стоит на месте, он только начинает набирать охват. Белорусские проектировщики начинают активно внедрять беспилотные летательные аппараты, что в будущем даст стране новые высокотехнологичные проекты в строительстве и не только.